

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-167873

(43)Date of publication of application : 25.06.1996

(51)Int.Cl.

H04B 10/00

H04K 1/00

(21)Application number : 06-311030

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
<NTT>

(22)Date of filing : 14.12.1994

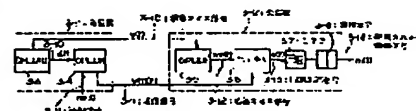
(72)Inventor : KITAYAMA KENICHI

(54) OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

(57)Abstract:

PURPOSE: To provide an optical communication system which excels in a fast operation and high privacy by using a demodulator circuit that demodulates the information signal based on the differential signal obtained between the output laser beam of an optical phase synchronous circuit and a transmitting signal.

CONSTITUTION: A transmitter 3-1 consists of an OPLL#0 which outputs a laser beam of a chaotic phase and an OPLL#1 which outputs a laser beam of a chaotic phase that is equal to that of the OPLL#0. A receiver 3-2 consists of an OPLL#1' which outputs a laser beam of a chaotic phase that is equal to that of the OPLL#0, an optical mixer 3-6, an LPF 3-7 and a threshold element 3-8. The output laser beam of the OPLL#0 is inputted to the OPLL#1 and OPLL#1' as a drive chaos signal, and both OPLLs output the laser beams which are synchronized with each other. Then the OPLL#1 outputs the laser beam that is obtained by modulating its own circuit parameter by an information signal as a transmitting signal. The output laser beam of the OPLL#1' and the transmitting signal are inputted to the mixer 3-6 so that a differential signal is obtained between them. The information signal is demodulated based on the differential signal.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

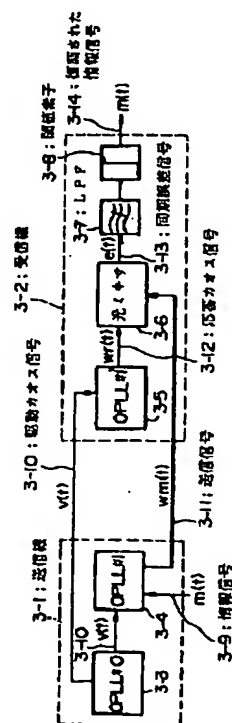
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(11)特許出願公開番号

(43)公開日 平成8年(1996)6月25日



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 コヒーレント光通信方式において、光送信機が光の位相に伝送しようとする情報信号を担わせてなる送信信号を送信し、光受信機が前記送信信号を受信して復調する光通信方式であって、前記光送信機をカオス的な位相のレーザ光を出力する第 1 の光位相同期回路および該第 1 の光位相同期回路と同一あるいは略同一のカオス的な位相のレーザ光を出力する第 2 の光位相同期回路から構成するとともに、前記光受信機を前記第 1 の光位相同期回路と同一あるいは略同一のカオス的な位相のレーザ光を出力する第 3 の光位相同期回路、光混合器、受光素子および復調回路から構成し、前記第 1 の光位相同期回路の出力レーザ光を駆動信号として前記第 2 および第 3 の光位相同期回路へ入力し、前記第 2 および第 3 の光位相同期回路からは同期したレーザ光を出力し、前記第 2 の光位相同期回路が自身の回路パラメータを前記情報信号で変調して得られるレーザ光を前記送信信号として出力し、前記第 3 の光位相同期回路の出力レーザ光と前記送信信号とを前記光混合器に入力して両者の差分信号を出力し、前記復調回路が前記受光素子で検出された前記差分信号に基づいて前記情報信号を復調することを特徴とする光通信方式。

【請求項 2】 前記情報信号は 2 値の信号であるとともに、前記変換手段は積分手段および閾値素子からなり、前記積分手段が前記受光素子で検出された前記差分信号を所定の継続時間で積分し、前記閾値素子が前記積分手段の出力を予め設定された閾値と比較して前記 2 値のいずれか一方を出力して前記情報信号を復元することを特徴とする請求項 1 記載の光通信方式。

【請求項 3】 前記積分手段は低域漏波器であることを特徴とする請求項 2 記載の光通信方式。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、特に高度な守秘性が要求される秘話通信や放送分配通信の分野で様々な利用形態が考えられる光通信方式に関する。

【0002】

【従来の技術】光通信の分野において、従来よりいくつかの光符号化多重伝送方式が提案されている。図 8 は、最初に提案された光符号化多重伝送方式 (D.B.Mortimore, Electron. Lett, vol. 21, p. 42 (1985) 参照) を適用した光通信システムの概略構成を示すブロック図である。この図において、1-1 は送信機、1-2 は電気/光変換部、1-3 は光符号化器、1-4 は $n \times 1$ のスターカップラ、1-5 は光伝送路、1-6 は $1 \times n$ のスターカップラ、1-7 は光復号器、1-8 は光/電気変換部、1-9 は受信機である。

【0003】このような構成によれば、送信端におい

て、送信機 1-1 から出力される送信信号が電気/光変換部 1-2 で光信号に変換され、光符号化器 1-3 を通して相手方の受信機 1-9 に割り当てられた特定のパルス符号列によって符号化され、光符号化信号が生成される。この光符号化信号は $n \times 1$ のスターカップラ 1-4 で合波され、光伝送路へ送出されることになる。

【0004】一方、受信端においては、送信されてきた光符号化信号が、 $1 \times n$ のスターカップラ 1-6 によって、各受信端の光復号器 1-7 に分配される。分配された光符号化信号は、それぞれ、光復号器 1-7 で所定の相関をとられ、その結果得られる自己相関のピーク値が光/電気変換部 1-8 において電気信号に変換された後、受信機 1-9 において閾値処理されて一定のレベル以上のときには、出力として“1”が再生される。この際、自己相関出力を得ることができるのは、送信に用いたものと同じのパルス符号列を割り当てられた受信機のみであり、これと異なるパルス符号列を有する受信機では、送信信号を受信することができない。このようにして秘話通信が可能となるのである。

【0005】図 9 は上記システムにおいて従来より用いられている光符号化器 1-3 の概略構成を示す図であり、2-1 は光ファイバ、2-2 はスターカップラ、2-3 は伝達すべき 2 値の情報を担った光パルス、2-4 は符号化されたチップである。光ファイバ 2-1 の本数は、チップの符号化パターンに合わせて、チップ数から 1 までの値をとり得る。例えば、光ファイバ 2-1 の本数がチップ数に等しい場合には、全てのチップが“1”を意味する。

【0006】光ファイバ長は、図 9 の上から順にチップレートの遅延時間に相当する長さ分だけ異なり、各光ファイバ 2-1 の入出力端はそれぞれ、電気/光変換部 1-2 側のスターカップラ 2-2 (図中左側) と $n \times 1$ のスターカップラ 1-4 側のスターカップラ 2-2 (図中右側) とに接続されている。入力光パルス 2-1 は、スターカップラ 2-2 で各光ファイバ 2-1 に分配されるが、各分配光は各光ファイバを伝播することで各々異なる時間だけ遅延されるので、再度スターカップラ 2-2 で合波されると所定の符号化パルス列に変換される。なお、光復号器 1-7 (図 8 参照) では、上記符号化パルス列を図中右側のスターカップラ 2-2 に入力し、図中左側のスターカップラ 2-2 から取り出すことによって相関値が得られる。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】ところで、上述した従来の光通信方式 (光符号化多重伝送方式) においては、光復号器 1-7 に極めて大きな負荷がかかるという欠点があった。具体的には、従来の復号化においては、送信されてきた光符号化信号のパルス列を時系列で直列に復号器 1-7 に入力して相関演算を行うので、後段の受信機 1-9 等の電子回路は、情報ビットレートの数 10 ~

数1000倍にあたるチップの繰り返し周波数に相当するチップレートの応答速度が必要となり、これが伝送の高速化の障害になっていた。

【0008】また、高度な守秘性が要求される秘話通信等において、秘話性を向上させるためにはチップ数を増やす必要があるが、受信機の応答速度には制限があるために、秘話性と情報ビットレートがトレードオフの関係になり、高速かつ秘話性に優れた通信システムの実現は実際上困難であった。本発明は、上述した欠点に鑑みて為されたものであり、高速かつ秘話性に優れた光通信方式を提供することを目的としている。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明による光通信方式は、コヒーレント光通信方式において、光送信機が光の位相に伝送しようとする情報信号を担わせてなる送信信号を送信し、光受信機が前記送信信号を受信して復調する光通信方式であって、前記光送信機をカオス的な位相のレーザ光を出力する第1の光位相同期回路および該第1の光位相同期回路と同一あるいは略同一のカオス的な位相のレーザ光を出力する第2の光位相同期回路から構成するとともに、前記光受信機を前記第1の光位相同期回路と同一あるいは略同一のカオス的な位相のレーザ光を出力する第3の光位相同期回路、光混合器、受光素子および復調回路から構成し、前記第1の光位相同期回路の出力レーザ光を駆動信号として前記第2および第3の光位相同期回路へ入力し、前記第2および第3の光位相同期回路からは同期したレーザ光を出力し、前記第2の光位相同期回路が自身の回路パラメータを前記情報信号で変調して得られるレーザ光を前記送信信号として出力し、前記第3の光位相同期回路の出力レーザ光と前記送信信号とを前記光混合器に入力して両者の差分信号を出力し、前記復調回路が前記受光素子で検出された前記差分信号に基づいて前記情報信号を復調することを特徴としている。

【0010】

【作用】上記構成によれば、光送信機の第2の光位相同期回路と光受信機の第3の光位相同期回路とがカオス同期する。そして、前記第2の光位相同期回路が自身の回路パラメータを情報信号で変調して得られるレーザ光を送信信号として出力し、前記第3の光位相同期回路の出力レーザ光と前記送信信号との差分信号が得られる。この差分信号に基づいて復調回路が前記情報信号を復調する。

【0011】

【実施例】以下、図面を参照して、本発明の一実施例について説明する。図1は本発明の一実施例による光通信方式の原理的な構成を表わすブロック図であり、この図において、3-1は送信機（光送信機）、3-2は受信機（光受信機）である。また、3-3~3-5はPLLと同様な動作原理に基づいたOPLL（Optical Phase

Locked Loop）であり、以後、それぞれをOPLL#0（第1の光位相同期回路）、OPLL#1（第2の光位相同期回路）、およびOPLL#1'（第3の光位相同期回路）と称す。なお、OPLL#0およびOPLL#1は送信機3-1内に設けられており、OPLL#0はV(t)で表される駆動カオス信号（駆動信号）3-10をOPLL#1およびOPLL#1'へ入力する。また、OPLL#1にはm(t)で表される情報信号3-9も入力され、OPLL#1から出力される信号はwm(t)で表される送信信号3-11となる。

【0012】一方OPLL#1'は受信機3-2内に設けられ、wr(t)で表される応答カオス信号を出力する。受信機3-2内には、光ミキサ3-6が設けられており、この光ミキサ3-6は、OPLL#1からの送信信号3-11およびOPLL#1'からの応答カオス信号3-12を入力とし、e(t)=wm(t)-wr(t)で表される同期誤差信号3-13を出力する。

【0013】また、受信機3-2において、3-7はLPF（低域漏波（通過）フィルタ：Low Pass Filter）、3-8は閾値素子であり、順に光ミキサ3-6に後続して設けられ、閾値素子3-8からはm(t)で表される復調された情報信号3-9が出力されるように構成されている。ところで、PLLにおいて、後述するようである条件の下では、PLL内部のVCO（電圧制御発振器）からの出力がカオス的な振る舞いを示すことが知られている。

【0014】このことから、PLLと同様の動作原理に基づくOPLLもカオス的な振る舞いを示すことが理論的に予測できる。なお、本実施例による光通信方式においては、OPLL#0、OPLL#1、OPLL#1'は同一の構成および回路パラメータを有するものとする。OPLL#0のカオス的な位相を有する出力レーザ光を駆動カオス信号：v(t)としてOPLL#1とOPLL#1'に入力すると、OPLL#1とOPLL#1'は同期して作動し、同一のカオス的な位相を有するレーザ光を出力する。なお、カオスおよびカオスの同期については後に詳述する。

【0015】次に、カオス出力に情報を埋め込む方法について述べる。OPLL#1の回路パラメータに摂動を加えると、固有のカオスを維持した状態のままに摂動に応じて出力信号が僅かに変動する。したがって、光送信機3-1のOPLL#1の回路パラメータを情報信号によって変調することによって、カオス出力に情報を埋め込むことが可能である。

【0016】例えば、自由発振波長を2値の情報ビット列信号（情報信号）m(t)によって変調すると“0”に対しては無摂動の正規のカオスを示し、“1”に対するカオスには僅かな変化が生じる。したがって、結果的には、カオス的な位相が情報で変調された送信信号wm(t)が得られる。この送信信号wm(t)と駆動カオス

10

20

30

40

50

ス信号 $v(t)$ とを同時に 1 本の光ファイバ伝送路の互いに直交する偏波モードで伝送することによって、両者を互いに干渉することなく伝送できる。

【0017】受信機 3-2 の OPLL #1' は、送信機 3-1 の OPLL #1 と同一構成および同一回路パラメータのものであるため、駆動カオス信号 $v(t)$ に応じて OPLL #1 と同期して正規の（摂動のない）カオスを出力する。ところで、送信信号 $w_m(t)$ と受信機 3-2 で発生した応答カオス信号 $w_r(t)$ との差、すなわち同期誤差信号 $e(t)$ は、情報信号 $m(t)$ と一致する筈である。 $e(t) = w_m(t) - w_r(t)$ は光波の位相であるから、その検出には光検波器を用いることになり、自乗検波によって為される。

【0018】そして、光検波器の出力電気信号を LPF 3-7 によって 1 ビットの継続時間に亘って積分し、その後、閾値処理して“0”または“1”を判定することによって 2 値の原情報が再生され、受信が完了する。ここで、このような変調方式により得られる波形の一例を図 2 (a) および図 2 (b) に示す。なお、図 2 (a) には $e^2(t)$ の波形、図 2 (b) には積分出力の波形と閾値処理後の再生波形が示されている。

【0019】次に、図 3 を参照して、OPLL の動作原理について説明する。図 3 は、OPLL の動作原理を説明するための図であり、この図に示すように、コヒーレント光伝送では、位相同期検波法により受信光（入力信号）と再生搬送波の位相を比較することで位相差を検出し、位相変調信号を復調する。したがって、この方法では、送信されてくる光波（入力信号）と再生搬送波の位相差を一定に保つ必要があり、光の位相同期が必要となる。

【0020】ここで、OPLL の具体的な構成について説明する。図 4 は代表的な OPLL である判定帰還型 OPLL の構成を示すブロック図であり、この図において、6-1 は位相比較器であり、入力信号 6-10 が入力される。また、6-2 は 2 入力 2 出力の $\pi/2$ -ハイブリッド ($\pi/2$ -HYBRID) であり、一方の出力端にはフォトダイオード等の光検波器 6-3、LPF 6-4 および判定器 6-6 が順に接続され、他方の出力端には光検波器 6-3、遅延器 6-5 が順に接続されている。

【0021】6-7 は判定器 6-6 の出力および遅延器 6-5 の出力を入力とするミキサ、6-8 はループフィルタ、6-9 はループフィルタ 6-8 の後段に設けられたレーザであり、再生搬送波 6-11 を出力する。この再生搬送波 6-11 と入力信号 6-10 とが $\pi/2$ -ハイブリッド 6-2 へ入力されるよう構成されている。すなわち、PLL の VCO をレーザで置き換えたものであ

$$\dot{u} = g(v, w)$$

【数 2】

り、動作原理は PLL と同一である。

【0022】ここで重要な OPLL のカオス的な振る舞いについて述べる。カオスとは、決定論的な法則に従う系において現われるランダムな挙動である。カオスは鋭敏な初期値依存性を有するため、僅かな初期条件の誤差が予測不可能な出力変動をもたらす。PLL のカオスの例を図 5 (a), 図 5 (b) に示す。図 5 (a), 図 5 (b) はそれぞれ入力信号および再生搬送波のスペクトルを示している。これらの図に示されるように、再生搬送波のランダムなスペクトルはカオスの特徴である。

【0023】このようなカオスが発生する条件は理論的に与えられており、これを満たすように回路パラメータを選択することによってカオスを制御することができる。なお、カオスのパターン数は、 $\exp(\lambda t)$ で与えられる（ただし、 λ は後に述べるリアプノフ指数）ので、秘匿信号の数を時間の経過とともに増加させることができ、必要な数のカオスパターンをほぼ無制限に確保することができるといえる。

【0024】なお、本実施例では、駆動カオス信号と情報が埋め込まれた信号とを共に伝送する必要があるが、伝送路として偏波保存単一モード光ファイバを用いると、この 2 つの信号光を互いに直交する偏波で伝送することが可能である。2 つの偏波間における漏話は、実際上極めて小さいので、信号の干渉を無視することができる。

【0025】次に、本実施例の重要な動作原理となっているカオスの同期（文献 1 : L.M.Pecora & T.L.Carroll, Phys.Rev.Lett.64.821(1991) 参照）について説明する。図 6 はカオスの同期システムのモデルを示しており、この図において、8-1 は駆動システム（以後、駆動システム $v-w$ と称す）、8-2 は応答システム（以後、応答システム w' と称す）、8-3, 8-4 はサブシステムであり、以後、それぞれをサブシステム v , サブシステム w と称す。

【0026】8-5 は v で表される駆動カオス信号、8-6a, 8-6b はそれぞれ w , w_r で表される応答カオス信号である。カオスの同期とは、駆動カオス信号を入力として互いに同期した非線形サブシステム w と応答システム w' とが、等しいカオス信号を発生することであり、この同期はサブシステムの回路パラメータに摂動が加わっても固有のカオスを維持する、という回路パラメータの変動に対するロバスト性を有している。なお、 v, w, w' は状態変数ベクトルであり、一般的に次の常微分方程式（式 (1) ~ (3)）の解として定義され、OPLL の場合にも適用できる。

【数 1】

$$\dots (1)$$

$$\dot{w} = h(v, w) \quad \dots \quad (2)$$

【数3】

$$\dot{w}' = h(v, w') \quad \dots \quad (3)$$

【0027】図6において、駆動システム $v-w$ はサブシステム v とサブシステム w とから構成され、出力 v が応答システム w' を駆動している。この際、十分に時間が経過した後に、カオス的な出力 w と w' とが等しくなるとき、 w と w' とは同期しているという。 w と w' とが同期するための必要条件は、関数 h の w のみに関する変分方程式の全てのリアプノフ指数が負であることである。詳細は省略するが、PLLにおいては、このリアプノフ指数が負となりシステムがカオス的な振る舞いをすることが証明されている（文献2：T.Endo&L.Chua, IEEE Trans.Circuits.Syst.38,1580(1991)参照）。

【0028】なお、このようなカオスの同期を利用した秘話通信の基本的な概念は既に文献1で提案されているが、具体的な光通信システムへの応用は未検討である。図1に示す本実施例は、コヒーレント光通信に上記概念を最初に適用したものであり、PLLを利用するためにシステム構成を大幅に変更している。以下、両者の相違点について述べる。

【0029】図7は文献1による基本的な通信システムの構成であり、9-1は送信機、9-2は受信機、9-3はサブシステム v 、9-4はサブシステム w 、9-5はサブシステム w' 、9-6はサブシステム v' 、9-7は $m(t)$ で表される情報信号 $m(t)$ 、9-8は $v(t)$ で表される駆動カオス信号、9-9は $r(t)$ で表される送信信号、9-10a、9-10bはそれぞれ $w(t)$ および $wr(t)$ で表される応答カオス信号、9-11は $vr(t)$ で表される同期駆動信号、9-12は $e(t)$ で表される同期誤差信号である。

【0030】いま送信機9-1のサブシステム w と受信機9-2のサブシステム w' とが駆動カオス信号 $v(t)$ に対して同期しているものと仮定し、この場合において、図7に示すシステムと図1に示すシステムとの主な相違点を列挙する。・送信機を構成する2つのサブシステム間の信号の流れが、図7では両方向であるが、図1では片方向である。・図7では情報が駆動カオス信号 $v(t)$ に埋め込まれるのに対して、図1では情報が駆動カオス信号ではなく応答信号 $w(t)$ に埋め込まれる。・図7では送信する信号は情報を埋め込んだ駆動カオス信号 $vm(t)$ であるが、図1では情報を埋め込んだ応答信号 $wm(t)$ と駆動カオス信号 $v(t)$ の2つである。このように、図7に示す構成と図1に示す構成（本実施例の構成）とは大きく異なっている。

【0031】以上説明したように、本実施例は、従来と異なる構成とし、PLLにおけるカオス的なレーザ出力光を情報の秘匿信号（情報を埋め込むための信号）に

用い、受信端でこれと同期したPLLから発せられるカオス的なレーザ光（再生光）を用いてこれを復号するので、情報ビットレートより高速の光検出器を必要とせず、しかも秘匿信号として用いるPLLのカオスのパターン数は時間と共に指数関数的に増大するので、多数の秘匿信号が確保でき、システムの大規模化も容易に実現することができる。なお、上述した一実施例においては、PLL#0、PLL#1およびPLL#1#1'が同一の構成および回路パラメータを有するよう規定したが、各PLLの構成および回路パラメータが略一致していれば、ほぼ同一の効果が得られる。

【0032】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、光送信機の第2の光位相同期回路と光受信機の第3の光位相同期回路とがカオス同期する。そして、前記第2の光位相同期回路が自身の回路パラメータを情報信号で変調して得られるレーザ光を送信信号として出力し、前記第3の光位相同期回路の出力レーザ光と前記送信信号との差分信号が得られる。この差分信号に基づいて復調回路が前記情報信号を復調する。

【0033】すなわち、光位相同期回路におけるカオス的なレーザ出力光を情報の秘匿信号（情報を埋め込むための信号）に用い、受信端でこれと同期した光位相同期回路から発せられるカオス的な再生光を用いてこれを復号するので、情報ビットレートより高速の光検出器を必要としないため、高速かつ秘話性に優れた光通信方式を実現できるという効果を有する。さらに、秘匿信号として用いる光位相同期回路のカオスのパターン数は時間と共に指数関数的に増大するので、多数の秘匿信号が確保でき、システムの大規模化も容易に実現することができるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は本発明の一実施例による光通信方式を適用したシステムの原理的な構成を示すブロック図である。

【図2】図2は同方式の変調例を示す図であり、(a)は $e^2(t)$ 、(b)は(a)に対する積分出力と閾値処理後の再生波形を示す。

【図3】図3はPLLの動作原理を説明するための図である。

【図4】図4は代表的なPLLである判定帰還型PLLの構成を示す図である。

【図5】図5はPLLのカオスの一例を示す図であり、(a)は入力信号、(b)は再生搬送波のスペクトルを示す。

【図6】図6はカオスの同期システムのモデルを示す図である。

【図7】図7は文献1による基本的な通信システムの構成例を示す図である。

【図8】図8は光符号化多重伝送方式のシステム構成例を示すブロック図である。

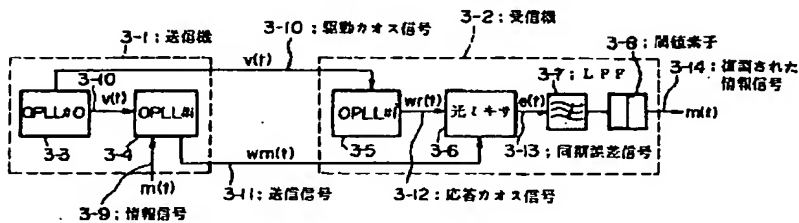
【図9】図9は従来用いられていた光符号化器を説明するための図である。

【符号の説明】

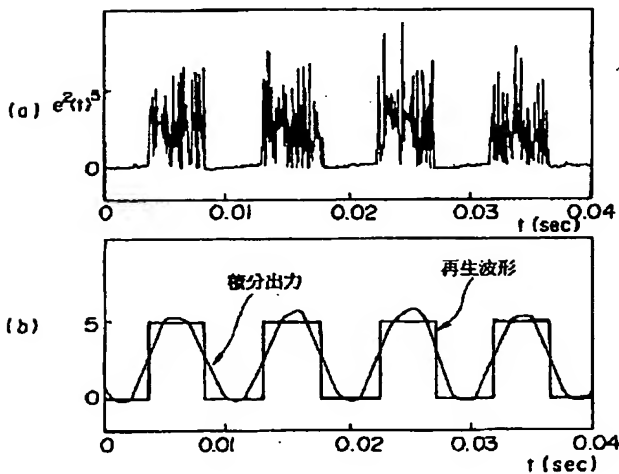
1-1, 3-1, 9-1…送信機、1-2…電気/光変換部、1-3…光符号化器、1-4… $n \times 1$ のスターカップラ、1-5…光伝送路、1-6… $1 \times n$ のスターカップラ、1-7…光復号器、1-8…光/電気変換部、1-9, 3-2, 9-2…受信機、2-1…光ファイ

バ、2-2…スターカップラ、2-3…光パルス、2-4…チップ、3-3~3-5…OPLL、3-6…光ミキサ、3-7…LPF、3-8…閾値素子、3-9, 9-7…情報信号、3-10, 8-5, 9-8…駆動カオス信号、3-11, 9-9…送信信号、3-12, 8-6a, 8-6b, 9-10a, 9-10b…応答カオス信号、3-13, 9-12…同期誤差信号、3-14…復調された情報信号、6-1…位相比較器、6-2… $\pi/2$ -ハイブリッド、6-3…光検波器、6-4…LPF、6-5…遅延器、6-6…判定器、6-7…ミキサ、6-8…ループフィルタ、6-9…レーザ、6-10…入力信号、6-11…再生搬送波、8-1…駆動システム、8-2…応答システム、8-3, 8-4, 9-3~9-6…サブシステム、9-11…同期駆動信号。

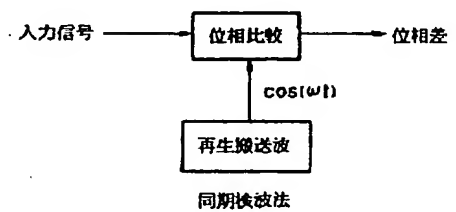
【図1】



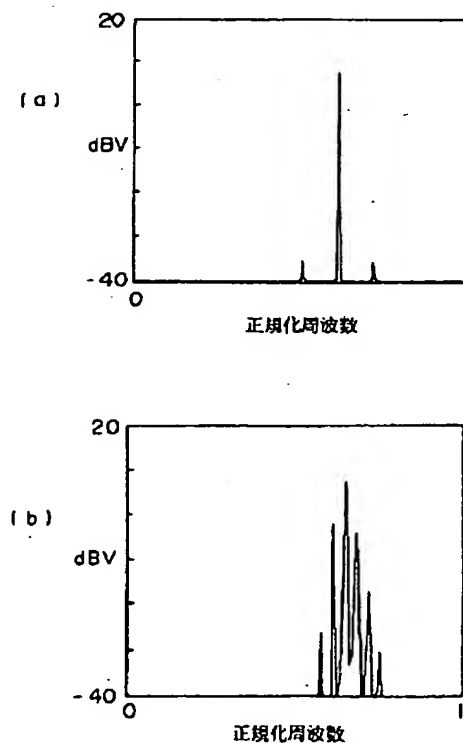
【図2】



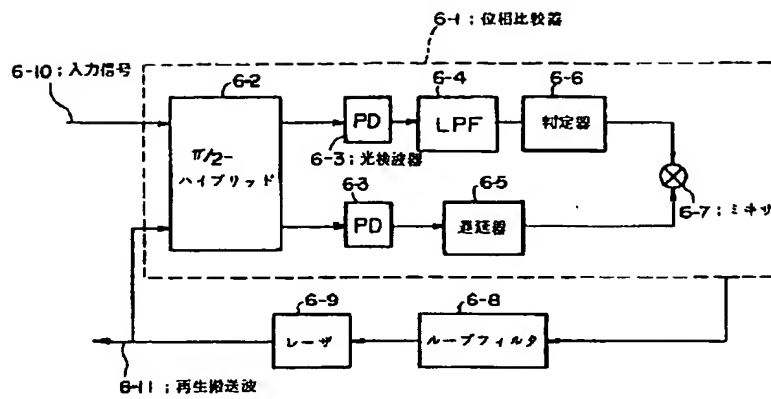
【図3】



【図5】

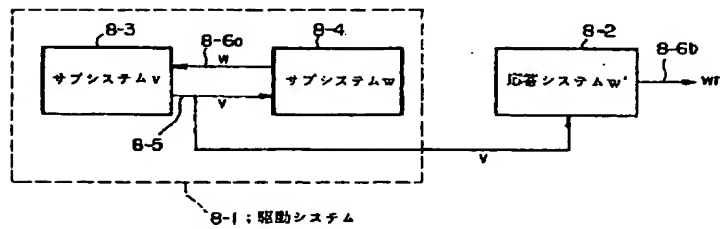


【図 4】



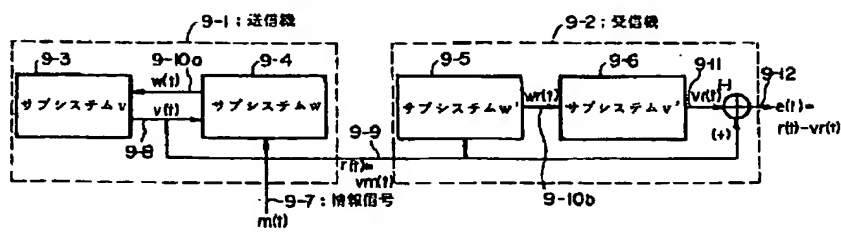
判別遅延型OPLL

【図 6】

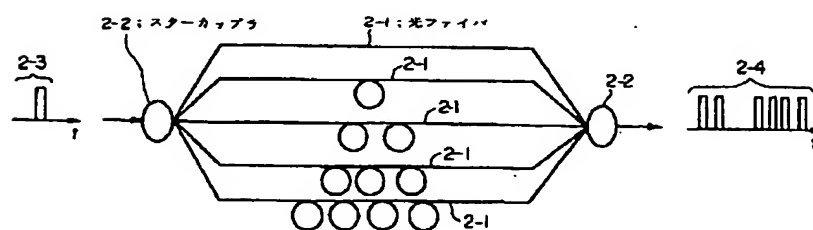


カオスの同期システムのモデル

【図 7】



【図 9】



【図 8】

